

## ANNEXE 14 : Modèle Veriflux (5 pages)

### Méthode d'évaluation des flux thermiques rayonnés – modèle de calcul VERIFLUX

Le modèle choisi pour modéliser le flux thermique rayonné est le modèle de la flamme solide. La flamme est vue soit comme un radiateur plan vertical (foyer de section rectangulaire) soit comme un cylindre vertical (foyer de section circulaire).

#### Equation générale

L'équation générale pour calculer le flux thermique reçu par une cible peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \tau \cdot F$$

- avec
- $\Phi$  = Radiation moyenne reçue par une cible en kW/m<sup>2</sup>
  - $\Phi_0$  = Radiation émise à la surface de la flamme en kW/m<sup>2</sup>
  - $\tau$  = Transmission atmosphérique (sans dimension)
  - $F$  = Facteur de configuration (sans dimension) (appelé également facteur de vue)

#### Calcul de la hauteur de flamme

La hauteur de flamme pour un feu est fonction :

- du taux de combustion
- de la surface du feu
- de la densité de l'air ambiant.

Elle est calculée selon la corrélation de THOMAS.

Dans des situations sans vent, la hauteur de flamme est donnée le plus souvent par la formule

suivante :

$$\frac{H}{D_{eq}} = 42 \left( \frac{\dot{m} \cdot \tau}{\rho_0 \sqrt{g \cdot D_{eq}}} \right)^{0.61}$$

- avec
- $H$  = hauteur moyenne de flamme en mètre
  - $D_{eq}$  = diamètre équivalent de la surface impliquée dans l'incendie (foyer actif) en mètre
  - $\rho_0$  = densité de l'air ambiant en kg.m<sup>-3</sup> (environ 1,22 kg/m<sup>3</sup> à 20°C)
  - $\dot{m}$  = débit masse surfacique en kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>
  - $g$  = accélération de la pesanteur en m.s<sup>-2</sup> ( $g = 9.81$ )

La forme de la flamme, la plus couramment rencontrée, peut être représentée par un cylindre vertical. Pour les feux non circulaires, afin d'assimiler la flamme à un cylindre vertical, il est nécessaire de calculer le diamètre équivalent avec la formule suivante :

$$D_{eq} = \frac{4 \times \text{surface du feu (m}^2\text{)}}{\text{périmètre du feu (m)}}$$

Cependant, cette formule ne peut être utilisée dès l'instant où le ratio longueur/largeur de la surface en feu est supérieur à 4.

#### Estimation de la vitesse de combustion

La vitesse de combustion (également appelée taux de combustion ou débit massique de combustion) est un paramètre nécessaire au calcul de la hauteur de flamme. De manière schématique, elle traduit la cadence de consommation du combustible.

La vitesse de combustion ( $m''$ ) d'un composé solide donné n'est pas une constante ; elle dépend du renouvellement de l'air au voisinage de la flamme et des échanges thermiques avec le milieu ambiant.

Le taux massique surfacique de combustion d'un mélange de produits combustibles est obtenu à partir de la somme pondérée des taux massiques surfaciques de combustion de chacun des produits impliqués :

$$m'' = \sum x_i m''_i$$

avec :

$x_i$  : fraction pondérale du combustible  $i$  impliqué dans l'incendie (sans dimension)

$$x_i = \frac{m_i}{\text{masse totale de substances combustibles stockées}}$$

$m''_i$  : taux massique surfacique de combustion du combustible  $i$  ( $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ )

En outre, lorsque les produits combustibles sont entreposés au sol et de façon espacée, mais pas suffisamment pour garantir la non propagation du feu, le taux massique surfacique de combustion est pondéré par un facteur correspondant au pourcentage de surface effectivement occupée par les combustibles.

Les taux de combustion de nombreux composés courants ont été déterminés expérimentalement par différents organismes et sont décrits dans la littérature. Le tableau ci-dessous présente à titre indicatif les caractéristiques de certains produits génériques :

Matériaux	Taux de combustion ( $\text{g/m}^2\cdot\text{s}$ )	Source
Bois, papier, carton	14	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - Third Edition
Cartons formés	50	INERIS - <i>TE EDD entrepôt BOCQUET LOGISTIC</i> - Nov. 1999
Produits alimentaires secs	15	INERIS - <i>TE EDD PRD distripole de Thionville</i> - Mars 2001

Assez peu de données sont disponibles dans la littérature au sujet des vitesses de combustion et flux émis par les flammes lors d'incendie de matériaux solides.

1. Au vu de la surface importante mise en jeu, nous précisons que cette approche est théorique et ne prend pas en compte le fait que le feu progresse et se déplace horizontalement dans le bâtiment. Il est en effet peu probable que l'incendie soit à son régime maximal simultanément sur toute la surface de la cellule considérée. Le calcul réalisé est donc majorant.

2. La cinétique d'un incendie de matière combustible solide est beaucoup plus lente que celle d'un incendie de liquides inflammables. Les effets de rayonnement thermique qui sont indiqués ci-après, pourraient éventuellement être constatés ½ h à 1 h après la détection de l'incendie. Ce décalage entre détection et constat des effets laisse à l'entreprise et aux personnels de secours le moyen de réagir et de placer la zone en situation de sécurité.

Valeur choisie pour caractériser les matières : A défaut d'essais réalisés sur les matières stockées, nous retiendrons la valeur suivante : **15  $\text{g/m}^2\cdot\text{s}$  pour les produits finis stockés sur le site.**

Flux émis en surface de flamme (radiance)

Le « flux émis en surface de la flamme » est également appelé « émissivité », « pouvoir émissif » ou « émittance ».

Il est donné par la relation de Stefan-Boltzman entre le pouvoir émissif de la flamme (flux radiatif émis) ( $W/m^2$ ), la constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$ ) le pouvoir émissif de la flamme (sans dimension) et la température de flamme (K).

En pratique, cette formule s'avère souvent difficile à appliquer pour de multiples raisons (température de la flamme difficile à mesurer, présence de fumées jouant un rôle d'écran).

C'est pourquoi, pour estimer le pouvoir émissif des flammes, on préfère :

- soit utiliser les valeurs expérimentales disponibles dans la littérature (TNO, INERIS),
- soit décider a priori d'un pouvoir émissif moyenné sur toute la hauteur des flammes, le plus souvent pris aux alentours de  $30 kW/m^2$  pour les grands feux pétroliers ( $> 2000 m^2$ ) (LANNOY – *Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre* – 1984),
- soit, pour les feux très fumigènes, employer la relation de Mudan (C. MUDAN – *Fire Hazards Calculations for large open hydrocarbon fires*), rappelée ci-dessous :

$$\Phi_0 = 140 \exp(-0.12Deq) + 20(1 - \exp(-0.12Deq))$$

avec :

- $\Phi_0$  : pouvoir émissif de la flamme ( $kW/m^2$ )
- Deq : diamètre équivalent de la surface en feu (m)

Cette corrélation rend compte de la diminution de  $\Phi_0$  (valeur minimale admissible =  $30 kW/m^2$ ) avec l'augmentation de la surface en feu, en raison, principalement, de la recrudescence des imbrûlés (suies) et donc de l'obscurcissement de la flamme. Elle a été établie notamment à partir de feux de kérosène ou de GPL et n'est adaptée qu'à des feux produisant des suies en quantités significative.

Les émissivités de composés courants décrites dans la littérature sont présentées à titre indicatif dans le tableau ci-dessous :

Matériaux	Radiance ( $kW/m^2$ )	Source
Bois, papier	23,8	DRYSDALE - <i>An introduction to fire dynamics</i> - 2nd edition
Cartons	30	INERIS - <i>TE EDD entrepôt BOCQUET LOGISTIC</i> - Nov. 1999
Produits alimentaires secs	30	INERIS - <i>TE EDD PRD distripole de Thionville</i> - Mars 2001

A noter par ailleurs que ces valeurs sont issues d'essais sur des petites quantités ou surfaces en feu. Dans le cas d'un feu réel mettant en jeu de grandes surfaces, les observations montrent que le flux thermique est réduit en raison de l'absorption du rayonnement par les fumées. Par ailleurs, la cinétique de combustion est limitée par l'apport d'oxygène qui ne peut se faire que sur le périmètre de la surface en feu. On peut dès lors considérer que la valeur retenue est majorante.

Remarque sur le choix du flux émis par les flammes

Sur les grands feux d'hydrocarbures, il ressort des études et des observations que les flammes sont obscurcies par la présence de suies et fumées absorbantes, surtout dans la partie supérieure de la flamme.

Il en résulte que l'émissivité réelle de la flamme est généralement très inférieure à l'émissivité théorique ou celle observable sur des feux de taille réduite (quelques  $m^2$ ).

L'émissivité des flammes retenue généralement pour les flux d'hydrocarbures de grande taille est de  $30 kW/m^2$  de surface de flamme (essais proserpine).

La partie supérieure a un pouvoir émissif beaucoup plus faible (d'environ  $20 kW/m^2$  ce qui correspond au rayonnement d'un corps noir à  $500^\circ C$ ).

Pour les produits combustibles solides, la littérature peut indiquer des valeurs d'émittance de flamme très supérieures à celles-ci. Il s'agit de valeurs obtenues sur feux bien oxygénés, au stade initial d'expansion de l'incendie.

Valeur choisie pour caractériser les matières céréalières : A défaut d'essais réalisés sur les produits stockés, nous retiendrons la valeur suivante : **30 kW/m<sup>2</sup> pour les produits finis susceptibles d'être stockés sur le site.**

#### Coefficient de transmission atmosphérique

La radiation de la flamme vers l'environnement est partiellement atténuée tout au long de son parcours dans l'air. Ceci est le fait de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et des poussières qui absorbent et dissipent une partie des radiations émises. La vapeur d'eau est le principal facteur d'absorption.

Le coefficient de transmission atmosphérique ( $\tau$ ) correspond donc à la fraction de chaleur transmise à l'atmosphère.

Ce coefficient de transmission peut être déterminé à l'aide d'abaque, comme une fonction de la distance et de l'humidité relative de l'air.

La formule de Brzustowski & Sommer malgré le domaine d'application restreint (température de flamme à 1500 K, température ambiante à 300 K, humidité relative supérieure à 10%, distance de la source à la cible comprise entre 30 et 50 m) peut être utilisée pour estimer l'ordre de grandeur du coefficient d'absorption atmosphérique dans des conditions plus larges.

$$\tau = 0.79 \left( \frac{100}{RH} \right)^{1/16} \left( \frac{30.5}{d} \right)^{1/16}$$

avec :

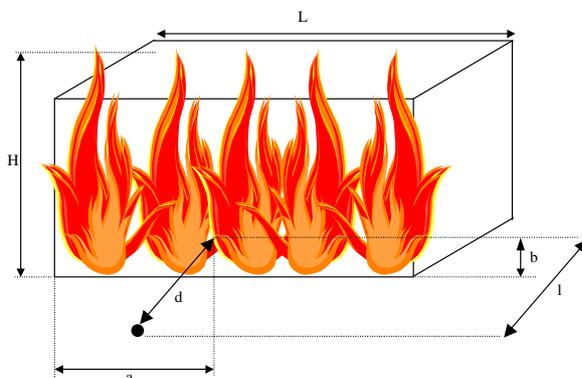
- |        |   |  |
|--------|---|--|
| $\tau$ | : | coefficient de transmission atmosphérique (sans dimension) |
| RH     | : | taux d'humidité de l'air (%)                               |
| d      | : | distance entre le centre de la flamme et la cible (m)      |

#### Facteur de configuration

Le facteur de vue F, fonction de l'angle solide sous lequel la cible reçoit le rayonnement, a été évalué selon la méthodologie développée dans l'ouvrage Yellow Book – rapport TNO CPR 14E, édition 1997, Chapitre 6 « Heat flux from fires ». Il a été tabulé en fonction de la géométrie de l'émetteur et des positions respectives de l'émetteur et de la cible, pour une cible verticale.

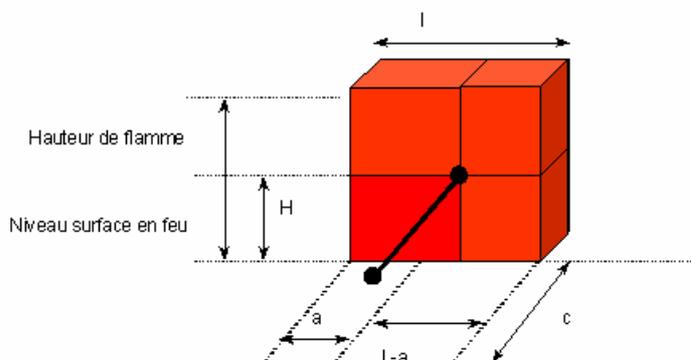
Le flux thermique reçu par un point situé face à un mur de flamme varie selon :

- la distance entre le récepteur et le mur de flamme (d),
- la hauteur de la cible par rapport au sol (c'est-à-dire base de la surface en feu) (h),
- la distance entre l'extrémité latérale du mur de flamme et la perpendiculaire au point concerné (a).



Tous paramètres étant égaux par ailleurs, le flux thermique est maximum au niveau de la médiatrice du mur de flamme et minimum aux extrémités latérales.

Le flux thermique étant maximum au centre du front de flamme, il faut considérer qu'on a quatre surfaces élémentaires. Les dimensions de ces surfaces permettent de tenir compte du flux reçu par un homme à un mètre du sol et/ou en limite du front de flamme.



#### Justification de la méthode de calcul

La méthode de calcul utilisée dans ce dossier a été développée par BUREAU VERITAS. Après le choix des paramètres de l'incendie, les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel Vériflux – BUREAU VERITAS.

Cette méthode, les hypothèses et les données d'entrée pour évaluer les flux thermiques rayonnés en cas d'incendie de matières combustibles ont fait l'objet de plusieurs analyses critiques par des tiers experts agréés par le MEEDDAT. Dans tous les cas les résultats des modélisations et des calculs effectués par les tiers experts étaient soit du même ordre de grandeur que ceux du BUREAU VERITAS, soit minorants.